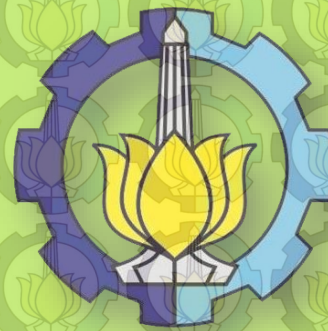


SEMINAR HASIL TUGAS AKHIR

DESAIN PENGENDALIAN PINTU AIR DENGAN METODE *ENSEMBLE* KALMAN FILTER DAN FUZZY *SLIDING MODE CONTROL* (FSMC)



Oleh: Fendi Ferdiansyah (1211100095)

Dosen pembimbing:

Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si.

NIP. 19660414 199102 2 001

ABSTRAK

Sungai Brantas sangat berpotensi banjir karena sepanjang sungai ini sudah dimanfaatkan sebagai pemukiman yang padat. Untuk mengontrol laju aliran sungai agar tidak terjadi banjir maka dibangun sebuah bendungan. Dibutuhkan suatu pengendali agar pintu air dapat membuka dan menutup secara otomatis agar laju aliran air sungai dapat dikontrol dengan baik. Pada tugas akhir ini Metode *ensemble* Kalman filter akan digunakan untuk mengestimasi ketinggian air sungai yang akan dijadikan sebagai *input* untuk pengendali. Metode *fuzzy sliding mode control* yang merupakan gabungan dari *sliding mode control* dan *fuzzy logic control* akan digunakan sebagai sistem pengendali pintu air. Estimasi ketinggian air dan debit air menggunakan persamaan St. Venant yang berbentuk kontinu dan akan didiskritisasi menggunakan beda hingga maju dan beda hingga tengah sehingga persamaan tersebut menjadi bentuk *state space* dari metode *ensemble* Kalman filter. Dan hasil dari estimasi ketinggian air dan debit air menggunakan *ensemble* Kalman filter memiliki tingkat keakuratan yang sangat baik karena error yang dihasilkan dari EnKf sangat kecil. Selanjutnya, dari hasil estimasi debit air akan digunakan untuk *input* pengendalian pintu air menggunakan *fuzzy sliding mode control*. Dengan menentukan fungsi keanggotaan dan menentukan aturan fuzzy untuk *control input* OP, maka dapat dihitung ketinggian air yang sudah dikontrol dengan metode *fuzzy sliding mode control*. Dan hasil dari pengendalian ketinggian air, pengendali *fuzzy sliding mode control* mampu bekerja dengan baik dengan debit air yang tinggi, sedang maupun rendah dan error yang dihasilkan kurang dari 0,1 meter.

LATAR BELAKANG MASALAH

1. Latar Belakang Masalah
2. Rumusan Masalah
3. Batasan Masalah
4. Tujuan
5. manfaat

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan Pembahasan

Kesimpulan

Daftar Pustaka

- ▶ Sungai Brantas sangat berpotensi banjir karena daerah sekitar sungai ini sudah dimanfaatkan sebagai pemukiman yang padat
- ▶ Di daerah Mojokerto dibangun sebuah bendungan untuk mengatur laju aliran air yang akan bermuara ke Kali Porong (Sidoarjo) dan Kalimas (Surabaya).
- ▶ Di bendungan Lengkong Baru, pengendalian buka tutup pintu airnya masih manual yang sangat rentan terjadi kesalahan
- ▶ Diperlukan pengendali agar pintu air dapat membuka dan menutup secara otomatis
- ▶ Metode ensemble Kalman filter akan digunakan untuk mengestimasi ketinggian air yang berada di bendungan
- ▶ Metode Fuzzy Sliding Mode Control akan diaplikasikan pada pintu air agar pintu air dapat membuka dan menutup secara otomatis

Pendahuluan

1. Latar Belakang Masalah
- 2. Rumusan Masalah**
3. Batasan Masalah
4. Tujuan
5. manfaat

RUMUSAN MASALAH

1. Bagaimana estimasi ketinggian air dan debit air menggunakan metode *ensemble* Kalman filter?
2. Bagaimana desain pengendalian pintu air menggunakan metode fuzzy *sliding mode control*?
3. Bagaimana analisa hasil penerapan metode fuzzy *sliding mode control* pada pintu air?

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan Pembahasan

Kesimpulan

Daftar Pustaka

Pendahuluan

1. Latar Belakang Masalah
2. Rumusan Masalah
- 3. Batasan Masalah**
4. Tujuan
5. manfaat

BATASAN MASALAH

- ▶ Ketinggian air yang diinginkan setelah melewati pintu air adalah konstan.
- ▶ Lintasan sungai diasumsikan lurus.
- ▶ Buka tutup pintu air dilakukan secara bersama-sama.
- ▶ Pengangkutan sedimen aliran sungai diabaikan.
- ▶ Tugas akhir ini mengambil studi kasus di bendungan Rolak Songo.
- ▶ Data yang digunakan dalam tugas akhir ini diperoleh dari Perusahaan Umum (Perum) Jasa Tirta 1.
- ▶ Tugas akhir ini hanya melakukan analisis pengendalian dengan metode *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC) tanpa membuat prototype pengendali.

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan Pembahasan

Kesimpulan

Daftar Pustaka

Pendahuluan

1. Latar Belakang Masalah
2. Rumusan Masalah
3. Batasan Masalah
- 4. Tujuan**
5. manfaat

TUJUAN

1. Mengetahui estimasi debit dan ketinggian air sungai dengan metode *ensemble* Kalman filter.
2. Mengetahui desain pengendalian pintu air dengan metode FSMC.
3. Mengetahui analisa hasil simulasi dari penerapan metode FSMC pada pengendalian pintu air.

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan Pembahasan

Kesimpulan

Daftar Pustaka

Pendahuluan

1. Latar Belakang Masalah
2. Rumusan Masalah
3. Batasan Masalah
4. Tujuan
5. **Manfaat**

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan Pembahasan

Kesimpulan

Daftar Pustaka

MANFAAT

Manfaat yang didapat dari penelitian tugas akhir ini adalah mendapatkan estimasi debit dan ketinggian air serta gambaran penerapan metode *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC) pada pengendalian pintu air di Bendungan Rolak Songo. Selain itu, penelitian ini juga dapat dipakai sebagai rujukan pada penelitian selanjutnya.

MODEL HIDRODINAMIKA 1D

1. Model Hidrodinamika 1D

2. Bendungan
3. Bendungan Lengkong baru
4. Ensemble Kalman filter
5. Sliding Mode Control
6. Fuzzy Logic Control
7. FSMC

► Persamaan kontuinitas

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

Diasumsikan tidak ada aliran lateral sehingga $q=0$

► Persamaan momentum

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

Dengan nilai $S_f = \frac{n^2 Q^2}{1.49 A^2 \left(\frac{4}{R^3} \right)}, \quad R = \frac{A}{P}$

1. Model Hidrodinamika 1D
- 2. Bendungan**
3. Bendungan Lengkong baru
4. Ensemble Kalman filter
5. Sliding Mode Control
6. Fuzzy Logic Control
7. FSMC

► Model Reservoir

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A[H(t)]} (Q_{in} - Q_{out}) \quad (3)$$

$$Q_{out} = Q_P + Q_G$$

Untuk reservoir yang tidak digunakan sebagai pembangkit listrik

$$Q_P = 0$$

► Pintu air

$$Q_G = \varepsilon \cdot OP \cdot A_G \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \quad (4)$$

$$\Delta H = H_U - H_D$$

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

1. Model Hidrodinamika 1D
2. Bendungan
3. **Bendungan Lengkong baru**
4. Ensemble Kalman filter
5. Sliding Mode Control
6. Fuzzy Logic Control
7. FSMC

Metodologi Penelitian

Analisa dan Pembahasan

Kesimpulan

Daftar Pustaka

BENDUNGAN ROLAK SONGO



Gambar 1. Bendungan rolak songo

Rolak Songo adalah sebuah bendungan pengontrol ketinggian air (check dam) yang terletak di Sungai Brantas yang merupakan sungai terbesar dan terpanjang di Jawa Timur. Bendungan ini digunakan untuk mengontrol laju aliran air Sungai Brantas yang akan bermuara ke Surabaya dan ke Porong. Fungsi utama bendungan Rolak Songo adalah untuk mengatur ketinggian air di Sungai Brantas agar bisa mengalir ke sebuah Kanal yang bernama Kanal Mangetan yang dibangun pada masa penjajahan Belanda untuk mengairi jutaan hektar sawah disekitar wilayah Kabupaten Sidoarjo. Agar air dari Sungai Brantas bisa masuk ke Kanal Mangetan maka diperlukan adanya bendungan dan hal inilah yang mendasari perlunya dibangun bendungan Rolak Songo.

1. Model Hidrodinamika 1D
2. Bendungan
3. Bendungan Lengkong baru
- 4. Ensemble Kalman filter**
5. Sliding Mode Control
6. Fuzzy Logic Control
7. FSMC

ENSEMBLE KALMAN FILTER

Secara umum bentuk dari sistem dinamik stokastik nonlinear pada EnKF adalah sebagai berikut:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (5)$$

Dengan pengukuran data nonlinear z_k :

$$z_k = H_k x_k + v_k$$

$$x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_{x_0}); w_k \sim N(0, Q_k); v_k \sim N(0, R_k)$$

1. Model Hidrodinamika 1D
2. Bendungan
3. Bendungan Lengkong baru
4. Ensemble Kalman filter
- 5. Sliding Mode Control**
6. Fuzzy Logic Control
7. FSMC

► Diberikan suatu sistem dinamis:

$$\dot{x}^{(n)}(t) = f(x, t) + b(x, t) \cdot u + d(t) \quad (6)$$

Jika x_d merupakan x yang diinginkan, maka *tracking error*-nya dapat dinyatakan oleh :

$$e(t) = x(t) - x_d$$

Didefinisikan suatu fungsi *switching*

$$S(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e, \quad \lambda > 0$$

Jika nilai $S(x, t) = 0$, maka fungsi *switching* diatas dapat disebut sebagai permukaan *sliding* (*sliding surface*).

Pendahuluan

FUZZY LOGIC CONTROL

Tinjauan Pustaka

1. Model Hidrodinamika 1D
2. Bendungan
3. Bendungan Lengkong baru
4. Ensemble Kalman filter
5. Sliding Mode Control
- 6. Fuzzy Logic Control**
7. FSMC

Metodologi Penelitian

Analisa dan Pembahasan

Kesimpulan

Daftar Pustaka

Struktur pengendali fuzzy tersusun dari empat buah komponen yang bekerja bersamaan dan dapat diuraikan sebagai:

1. *Rule-base*
2. *Interference mechanism*
3. Fuzzifikasi
4. Defuzzifikasi

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

1. Model Hidrodinamika 1D
2. Bendungan
3. Bendungan Lengkong baru
4. Ensemble Kalman filter
5. Sliding Mode Control
6. Fuzzy Logic Control
7. **FSMC**

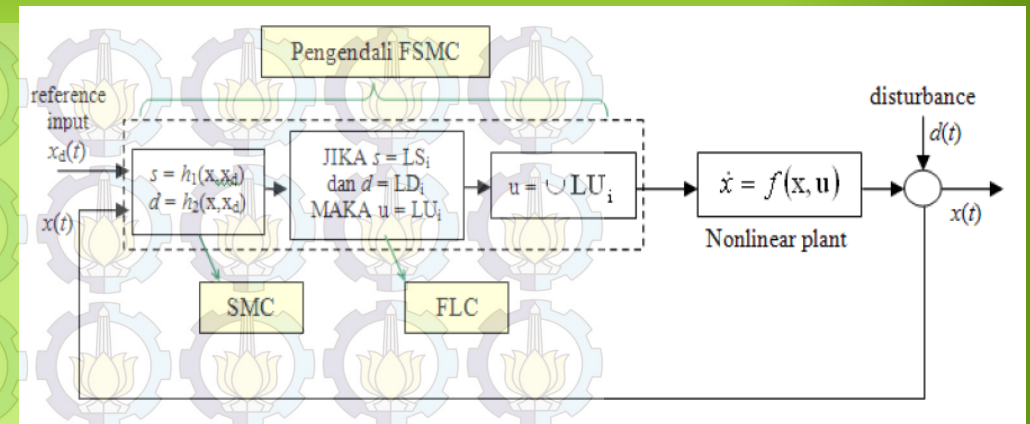
Metodologi Penelitian

Analisa dan Pembahasan

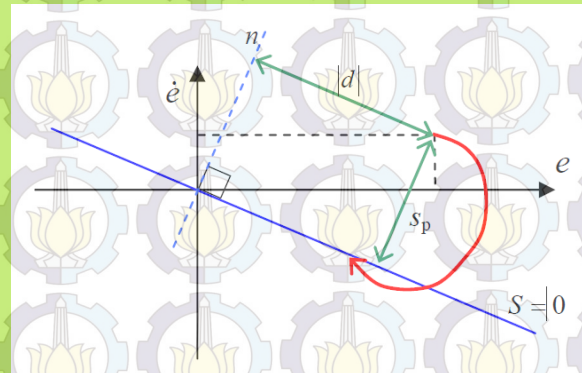
Kesimpulan

Daftar Pustaka

FUZZY SLIDING MODE CONTROL



Gambar 2. skema dasar pengendali FSMC pada suatu sistem loop tertentu



Gambar 3. interpretasi grafik S_p dan d

Berdasarkan interpretasi grafis S_p dan d pada bidang $e\dot{e}$, nilai S_p dapat diperoleh dengan menggunakan rumus jarak titik $A(e, \dot{e})$ ke garis S

$$S_p = \frac{|\dot{e} + \lambda e|}{\sqrt{1 + \lambda^2}}$$

$$\text{Dan } d = \sqrt{e^2 - S_p^2}$$

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

1. Tahapan Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

Kesimpulan

Daftar Pustaka

TAHAPAN PENELITIAN

- ▶ Studi Literatur
- ▶ Diskritisasi Model Hidrodinamika 1D
- ▶ Algoritma EnKf
- ▶ Simulasi dari algoritma EnKf
- ▶ Pemodelan Matematika pintu air
- ▶ Desain kendali SMC
- ▶ Simulasi Desain Kendali SMC
- ▶ Desain Kendali FSMC
- ▶ Simulasi Desain Kendali FSMC
- ▶ Analisa Hasil Simulasi
- ▶ Penyusunan Laporan Tugas Akhir.

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant

2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. Hasil Simulasi

Kesimpulan

Daftar Pustaka

PERSAMAAN ST. VENANT

Dari persamaan kontinuitas dan persamaan momentum

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

Diasumsikan tidak ada aliran lateral sehingga $q=0$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

$$\text{Dengan nilai } S_f = \frac{n^2 Q^2}{1.49 A^2 \left(\frac{4}{R^3} \right)}, \quad R = \frac{A}{P}$$

Dan syarat batas

$$\left. \frac{\partial Q}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$$

$$y(L, t) = y(L-1, t), \quad Q(L, t) = Q(L-1, t)$$

Agar algoritma EnKf dapat dijalankan maka kedua persamaan ini didiskritkan dengan menggunakan metode beda hingga.

$$\text{Beda hingga maju: } \frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_i^{j+1} - f_i^j}{\Delta t}$$

$$\text{Beda hingga pusat/tengah: } \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_{i+1}^j - f_{i-1}^j}{2\Delta x}$$

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant

2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. Hasil Simulasi

Kesimpulan

Daftar Pustaka

PERSAMAAN ST. VENANT

► Diskritisasi persamaan kontinuitas:

$$B \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$B \left(\frac{y_i^{j+1} - y_i^j}{\Delta t} \right) + \frac{Q_{i+1}^j - Q_{i-1}^j}{2\Delta x} = 0$$

Sehingga diperoleh:

$$y_i^{j+1} = y_i^j - \frac{\Delta t}{2B\Delta x} (Q_{i+1}^j - Q_{i-1}^j)$$

► Diskritisasi persamaan momentum:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gAS_f = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\alpha}{B} \left(\frac{2Qy \frac{\partial Q}{\partial x} - Q^2 \frac{\partial y}{\partial x}}{y^2} \right) + gBy \left(\frac{\partial y}{\partial x} + S_f \right) = 0$$

sehingga diperoleh:

$$Q_i^{j+1} = Q_i^j - \Delta t \left(\frac{\alpha}{B(y_i^j)^2} \left(2Q_i^j y_i^j \left(\frac{Q_{i+1}^j - Q_{i-1}^j}{2\Delta x} \right) - (Q_i^j)^2 \left(\frac{y_{i+1}^j - y_{i-1}^j}{2\Delta x} \right) \right) + gBy_i^j \left(\left(\frac{y_{i+1}^j - y_{i-1}^j}{2\Delta x} \right) + \right. \right.$$

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant

2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. Hasil Simulasi

Kesimpulan

Daftar Pustaka

PERSAMAAN ST. VENANT

▶ Untuk $i = 1$

$$y_1^{j+1} = y_1^j - \frac{\Delta t}{2B\Delta x} (Q_2^j - Q_0^j)$$

$$Q_1^{j+1} = Q_1^j - \Delta t \left(\frac{\alpha}{B(y_1^j)^2} \left(2Q_1^j y_1^j \left(\frac{Q_2^j - Q_0^j}{2\Delta x} \right) - (Q_1^j)^2 \left(\frac{y_2^j - y_0^j}{2\Delta x} \right) \right) + gB y_1^j \left(\left(\frac{y_2^j - y_0^j}{2\Delta x} \right) + \right.$$

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant

2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. Hasil Simulasi

Kesimpulan

Daftar Pustaka

PERSAMAAN ST. VENANT

▶ Untuk $\frac{\partial Q}{\partial x}\bigg|_{x=0} = 0$

$$\frac{Q_2^j - Q_0^j}{2\Delta x} = 0$$

$$Q_2^j = Q_0^j$$

▶ Untuk $\frac{\partial y}{\partial x}\bigg|_{x=0} = 0$

$$\frac{y_2^j - y_0^j}{2\Delta x} = 0$$

$$y_2^j = y_0^j$$

▶ Untuk $y(L, t) = y(L - 1, t)$

$$y_L^j = y_{L-1}^j$$

▶ Untuk $Q(L, t) = Q(L - 1, t)$

$$Q_L^j = Q_{L-1}^j$$

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant

2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. Hasil Simulasi

Kesimpulan

Daftar Pustaka

PERSAMAAN ST. VENANT

$$\begin{bmatrix} y_1^{j+1} \\ Q_1^{j+1} \\ y_2^{j+1} \\ Q_2^{j+1} \\ \vdots \\ y_{L-2}^{j+1} \\ Q_{L-2}^{j+1} \\ y_{L-1}^{j+1} \\ Q_{L-1}^{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ \vdots \\ f_{2L-5} \\ f_{2L-4} \\ f_{2L-3} \\ f_{2L-2} \end{bmatrix}$$

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant

2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. Hasil Simulasi

Kesimpulan

Daftar Pustaka

PERSAMAAN ST. VENANT

dengan

$$f_1 = y_1$$

$$f_2 = Q_1 - \Delta t \left(g B y_1^j (S_f)_1^j \right)$$

$$f_3 = y_2 - \frac{\Delta t}{2 B \Delta x} (Q_3^j - Q_1^j)$$

$$f_4 = Q_2 - \Delta t \left(\frac{\alpha}{B (y_2^j)^2} \left(2 Q_2^j y_2^j \left(\frac{Q_3^j - Q_1^j}{2 \Delta x} \right) - (Q_2^j)^2 \left(\frac{y_3^j - y_1^j}{2 \Delta x} \right) \right) + g B y_2^j \left(\left(\frac{y_3^j - y_1^j}{2 \Delta x} \right) + (S_f)_2^j \right) \right)$$

$$f_{2L-5} = y_{L-2} - \frac{\Delta t}{2 B \Delta x} (Q_{L-1}^j - Q_{L-3}^j)$$

$$f_{2L-4} = Q_{L-2} - \Delta t \left(\frac{\alpha}{B (y_{L-2}^j)^2} \left(2 Q_{L-2}^j y_{L-2}^j \left(\frac{Q_{L-1}^j - Q_{L-3}^j}{2 \Delta x} \right) - (Q_{L-2}^j)^2 \left(\frac{y_{L-1}^j - y_{L-3}^j}{2 \Delta x} \right) \right) + g B y_{L-2}^j \left(\left(\frac{y_{L-1}^j - y_{L-3}^j}{2 \Delta x} \right) + \right.$$

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant
- 2. Ensemble Kalman Filter**
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. Hasil Simulasi

Kesimpulan

Daftar Pustaka

ALGORITMA ENSEMBLE KALMAN FILTER

1. Model Sistem dan Pengukuran

Diberikan suatu sistem dinamik stokastik:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (5)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (6)$$

Persamaan (5) dan (6) adalah model sistem dan model pengukuran dengan w_k dan v_k adalah *noise system* dan *noise pengukuran*.

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan
St. Venant

**2. Ensemble Kalman
Filter**

3. Sliding Mode Control

4. Fuzzy Sliding Mode
Control

5. Hasil Simulasi

Kesimpulan

Daftar Pustaka

ALGORITMA ENSEMBLE KALMAN FILTER

2. Inisialisasi

$$x_0 = \{x_{01}, x_{02}, x_{03}, \dots, x_{0N},\}$$

$$\widehat{x}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{0i}$$

Karena x memiliki $2L-1$ variabel keadaan maka inisialisasi dilakukan dengan membangkitkan ensemble sebanyak N kali dengan variabel yang di ensemble sejumlah $2L-1$

$$x_0 = \begin{bmatrix} y_1^0 \\ Q_1^0 \\ y_2^0 \\ Q_2^0 \\ \vdots \\ y_{L-2}^0 \\ Q_{L-2}^0 \\ y_{L-1}^0 \\ Q_{L-1}^0 \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \begin{matrix} y_1^{0,1}, y_1^{0,2}, y_1^{0,3}, \dots, y_1^{0,N} \\ Q_1^{0,1}, Q_1^{0,2}, Q_1^{0,3}, \dots, Q_1^{0,N} \\ y_2^{0,1}, y_2^{0,2}, y_2^{0,3}, \dots, y_2^{0,N} \\ Q_2^{0,1}, Q_2^{0,2}, Q_2^{0,3}, \dots, Q_2^{0,N} \\ \vdots \\ y_{L-2}^{0,1}, y_{L-2}^{0,2}, y_{L-2}^{0,3}, \dots, y_{L-2}^{0,N} \\ Q_{L-2}^{0,1}, Q_{L-2}^{0,2}, Q_{L-2}^{0,3}, \dots, Q_{L-2}^{0,N} \\ y_{L-1}^{0,1}, y_{L-1}^{0,2}, y_{L-1}^{0,3}, \dots, y_{L-1}^{0,N} \\ Q_{L-1}^{0,1}, Q_{L-1}^{0,2}, Q_{L-1}^{0,3}, \dots, Q_{L-1}^{0,N} \end{matrix} \end{Bmatrix}$$

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant
2. **Ensemble Kalman Filter**
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. Hasil Simulasi

Kesimpulan

Daftar Pustaka

ALGORITMA ENSEMBLE KALMAN FILTER

3. *Time Update*

Setelah mendapatkan nilai tebakan awal x_0 selanjutnya dilakukan perhitungan dengan memasukkan nilai tebakan awal x_0 ke dalam model sistem.

$$\bar{x}_{k,j} = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_k$$

Dengan $w_k \sim N(0, Q_k)$.

Setelah mendapatkan preori dari masing-masing *ensemble* maka dicari nilai rata-rata preori sejumlah *ensemble*

$$\hat{x}_{\bar{k}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{x}_{\bar{k},j}$$

Selanjutnya dicari kovarian error. Kovarian *error* adalah ekspektasi dari selisih preori *ensemble* dengan nilai rata-rata preori dikuadratkan.

$$P_{\bar{k}} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\hat{x}_{\bar{k},j} - \hat{x}_{\bar{k}})(\hat{x}_{\bar{k},j} - \hat{x}_{\bar{k}})^T$$

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant
- 2. Ensemble Kalman Filter**
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. Hasil Simulasi

Kesimpulan

Daftar Pustaka

ALGORITMA ENSEMBLE KALMAN FILTER

4. Measurement Update

Dari model pengukuran, hasil dari model pengukuran akan di *ensemble* ditambah dengan noise dari data pengukuran.

$$z_{k,j} = Hz_k + v_k$$

Dengan $v_k \sim N(0, R_k)$.

Kemudian dicari kalman gainnya dengan menggunakan persamaan berikut

$$K_k = P_{\bar{k}} H^T (H P_{\bar{k}} H^T + R_k)^{-1}$$

Estimasi *measurement update*

Setelah mendapatkan kalman gain maka dihitung nilai estimasi untuk setiap *ensemble* x_k yang dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$\hat{x}_{k,j} = \hat{x}_{\bar{k},j} + K_k(z_{k,j} - H\hat{x}_{\bar{k},j})$$

Rata-rata dari estimasi *measurement update*

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \hat{x}_{k,j}$$

Kovarian dari *error estimasi measurement update*

$$P_k = [1 - K_k H] P_{\bar{k}}$$

Pada *ensemble* Kalman filter tahap no.3 biasanya sering disebut tahap prediksi sedangkan pada tahap no. 4 biasanya sering disebut tahap koreksi.

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant
2. Ensemble Kalman Filter
3. **Sliding Mode Control**
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. Hasil Simulasi

Kesimpulan

Daftar Pustaka

PERANCANGAN PENGENDALI PINTU AIR

Dari model reservoir dan pintu air didapat:

$$Q_G = \varepsilon \cdot OP \cdot A_G \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_U - H_D)}$$

$$\text{Sehingga } Q_{out} = \varepsilon \cdot OP \cdot A_G \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_U - H_D)}$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A[H(t)]} (Q_{in} - \varepsilon \cdot OP \cdot A_G \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_U - H_D)})$$

$$H(t+1) = H(t) - \Delta t \frac{1}{AH(t)} (Q_{in}(t) - b \cdot \sqrt{H(t) - H_D})$$

$$\text{Dengan } b = \varepsilon \cdot OP \cdot A_G \cdot \sqrt{2 \cdot g}$$

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant
2. Ensemble Kalman Filter
3. **Sliding Mode Control**
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. Hasil Simulasi

SLIDING MODE CONTROL

Tracking error: $e = H - H_d$
 $\dot{e} = \dot{H}$ (diasumsikan nilai H_d konstan)

Fungsi Switching: $S = \dot{H} + \lambda(H - H_d)$

$$\dot{S} = \ddot{H} + \lambda\dot{H}$$

Desain kendali:

$$OP = \frac{2\sqrt{H-H_D}(H\dot{Q}_{in}-\dot{H}Q_{in}+\lambda H Q_{in})}{bH\dot{H}-2b\dot{H}(H-H_D)+2b\lambda H(H-H_D)} - \min\left(-\frac{2\eta A H^2 \sqrt{H-H_D}}{by}\right) \text{sgn}(S)$$

Kesimpulan

Daftar Pustaka

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant
2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. **Fuzzy Sliding Mode Control**
5. Hasil Simulasi

Kesimpulan

Daftar Pustaka

FUZZY SLIDING MODE CONTROL

Dari hasil SMC diperoleh nilai *error* maksimal sebesar 1.0515 dan minimum sebesar -0.000343. dan nilai maksimal \dot{e} sebesar 0.00515 dan minimum sebesar -0.002898

Dari nilai e dan nilai \dot{e} kemudian nilai tersebut masuk pada persamaan S_p dan d yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya.

$$S_p = \frac{|\dot{e} + \lambda e|}{\sqrt{1 + \lambda^2}} = \frac{|0.00515 + 1.9 \cdot 1.0515|}{\sqrt{1 + 1.9^2}} = 0.9329$$

$$d = \sqrt{e^2 - S_p^2} = \sqrt{1.0515^2 - 0.9329^2} = 0.4851$$

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

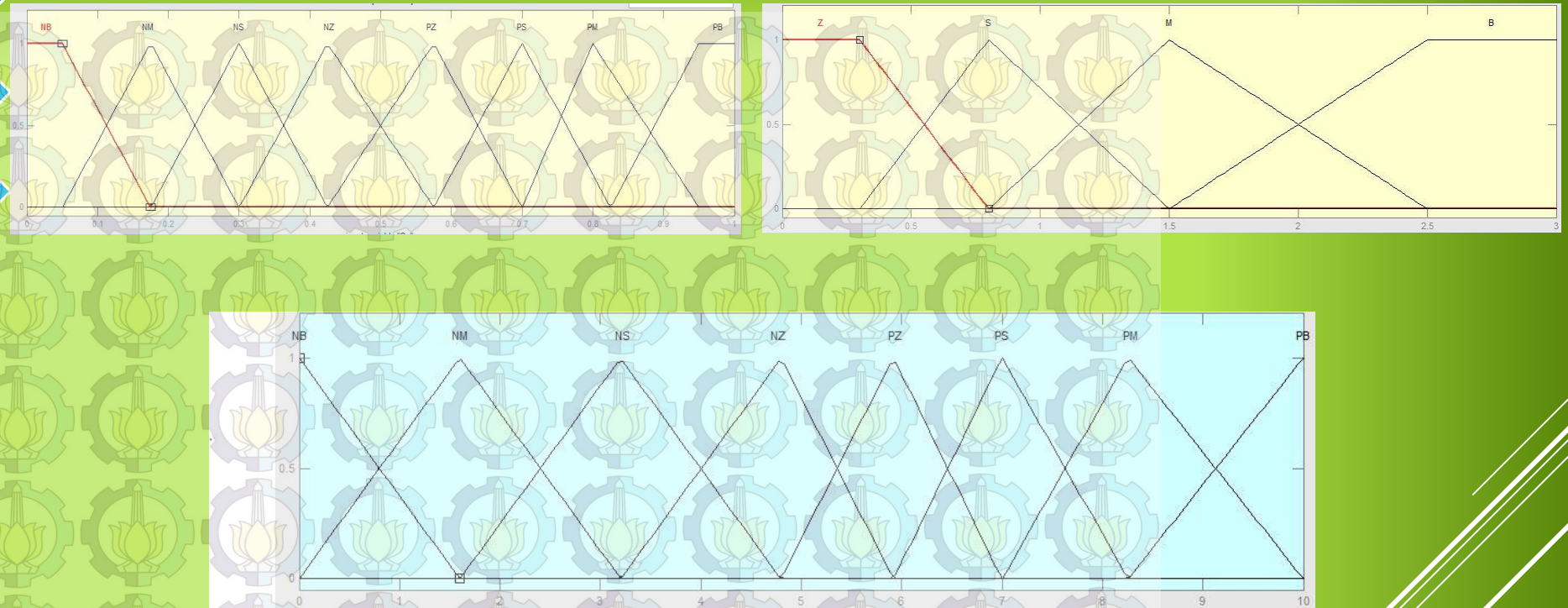
Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant
2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. **Fuzzy Sliding Mode Control**
5. Hasil Simulasi

Kesimpulan

Daftar Pustaka

FUZZY SLIDING MODE CONTROL



Gambar 4. membership function dari Sp , d dan OP

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant
2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. **Fuzzy Sliding Mode Control**
5. Hasil Simulasi

Kesimpulan

Daftar Pustaka

FUZZY SLIDING MODE CONTROL

Tabel 1. aturan fuzzy sebagai pengendali FSMC pada pintu air

		s_p							
		NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
d	B	NB	NB	NB	NB	PB	PB	PB	PB
	M	NB	NB	NB	NM	PM	PB	PB	PB
	S	NB	NB	NM	NS	PS	PM	PB	PB
	Z	NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

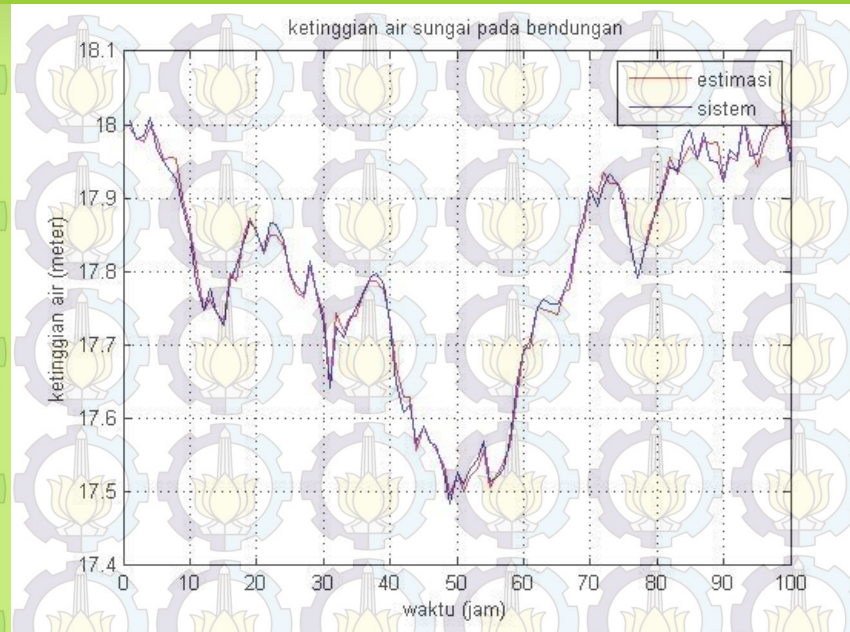
Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant
2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. **Hasil Simulasi**

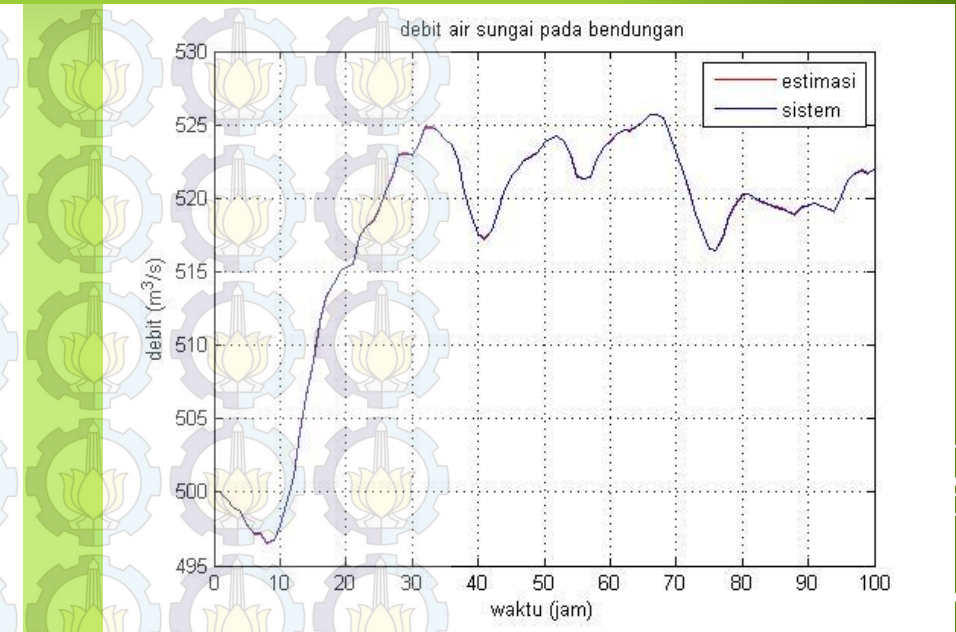
Kesimpulan

Daftar Pustaka

Hasil Simulasi dengan ketinggian awal 18 meter dan debit awal $500 \text{ m}^3/\text{s}$



Gambar 5. hasil estimasi ketinggian air dengan ketinggian awal 18 m



Gambar 6. hasil estimasi debit air dengan debit awal $500 \text{ m}^3/\text{s}$

Setelah simulasi dijalankan selama beberapa kali didapatkan RSME untuk ketinggian air sebesar 0,01101 dan RSME untuk debit air sebesar 0.0264.

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

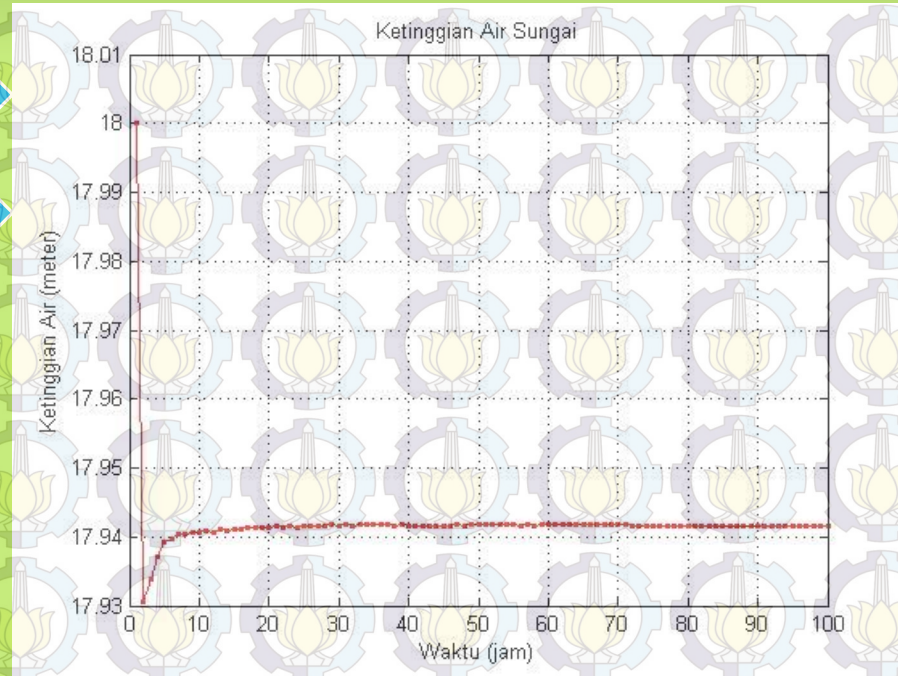
Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant
2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. Hasil Simulasi

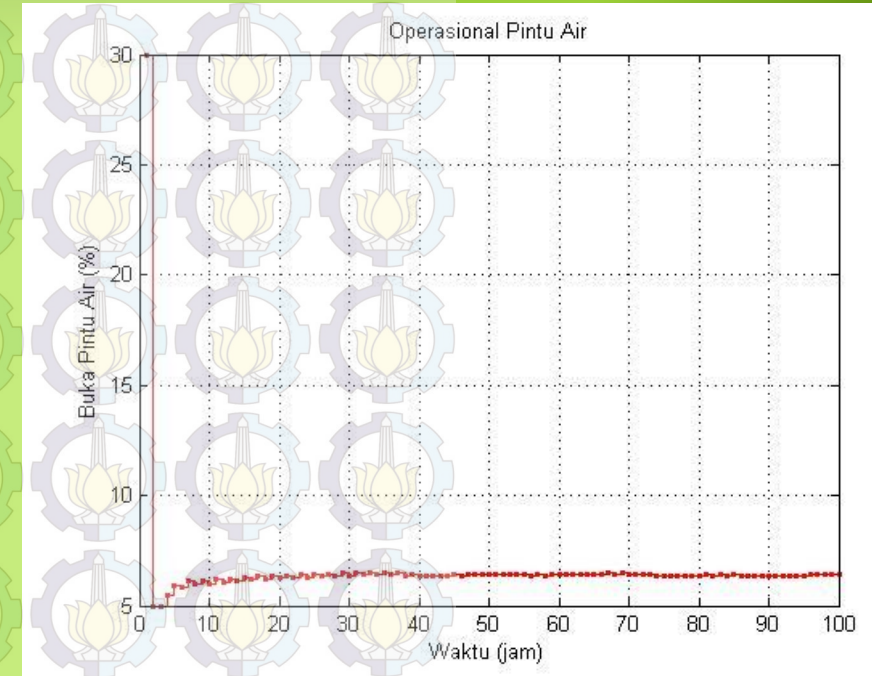
Kesimpulan

Daftar Pustaka

Hasil Simulasi pengendalian pintu air dengan ketinggian awal 18 m dan debit awal $500 \text{ m}^3/\text{s}$



Gambar 7. hasil estimasi ketinggian air dengan ketinggian awal 18 m



Gambar 8. hasil pengoperasian buka tutup pintu air

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

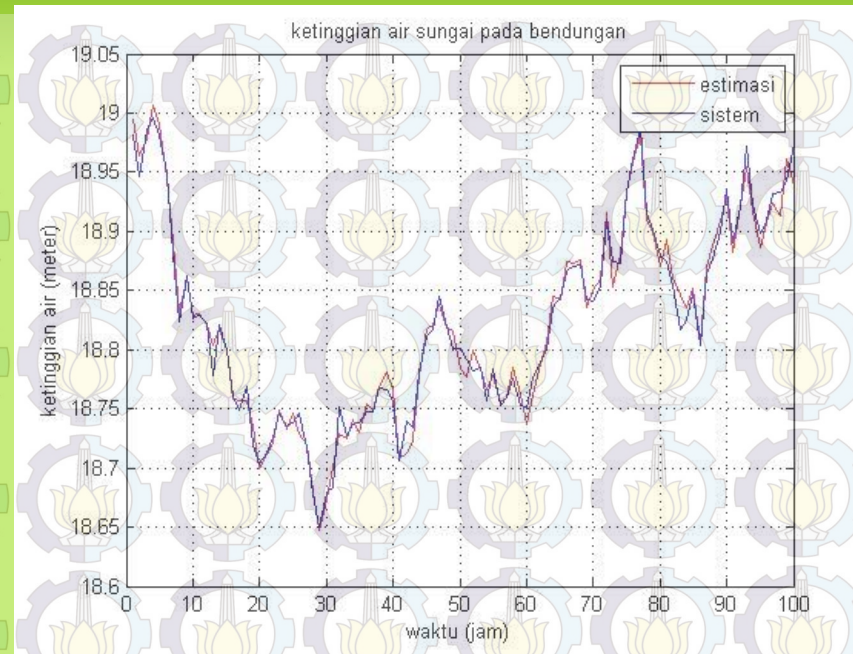
Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant
2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. **Hasil Simulasi**

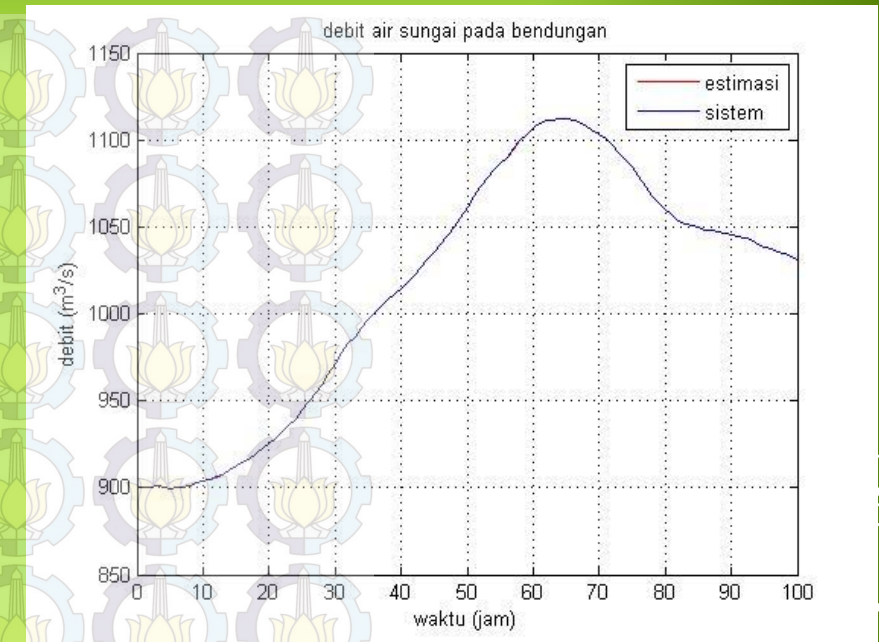
Kesimpulan

Daftar Pustaka

Hasil Simulasi dengan ketinggian awal 19 meter dan debit awal $900 \text{ m}^3/\text{s}$



Gambar 9. hasil estimasi ketinggian air dengan ketinggian awal 19 m



Gambar 10. hasil esimasi debit air dengan debit awal $900 \text{ m}^3/\text{s}$

Diperoleh RMSE untuk ketinggian air sebesar 0,03253 dan RMSE untuk debit air sebesar 0,02754.

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

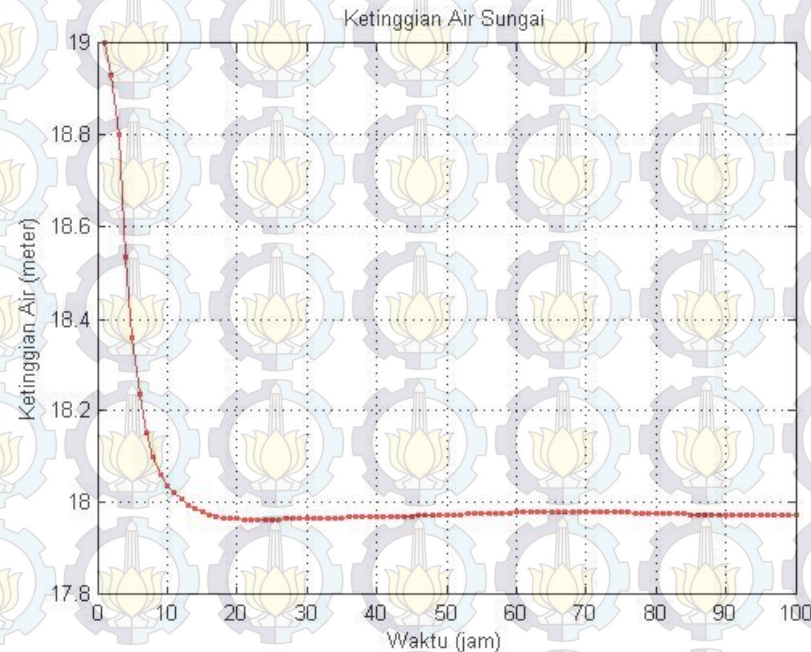
Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant
2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. Hasil Simulasi

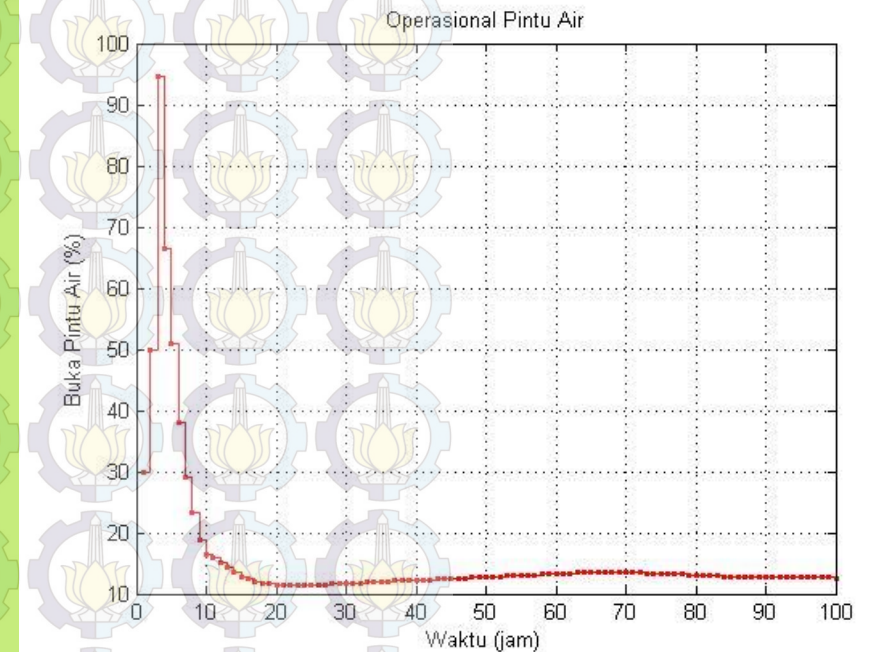
Kesimpulan

Daftar Pustaka

Hasil Simulasi pengendalian pintu air dengan ketinggian awal 19 m dan debit awal $900 \text{ m}^3/\text{s}$



Gambar 11. hasil estimasi ketinggian air dengan ketinggian awal 19 m



Gambar 12. hasil pengoperasian buka tutup pintu air

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

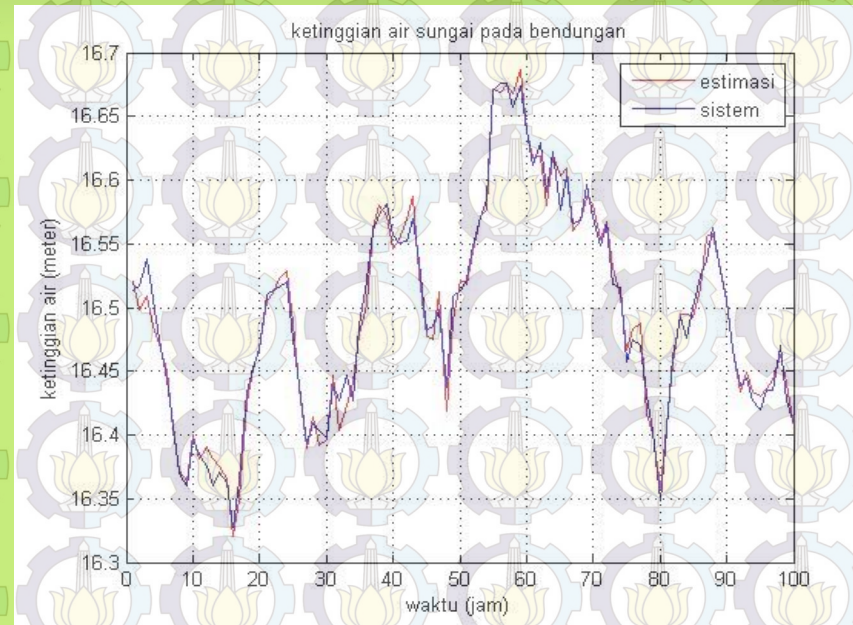
Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant
2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. **Hasil Simulasi**

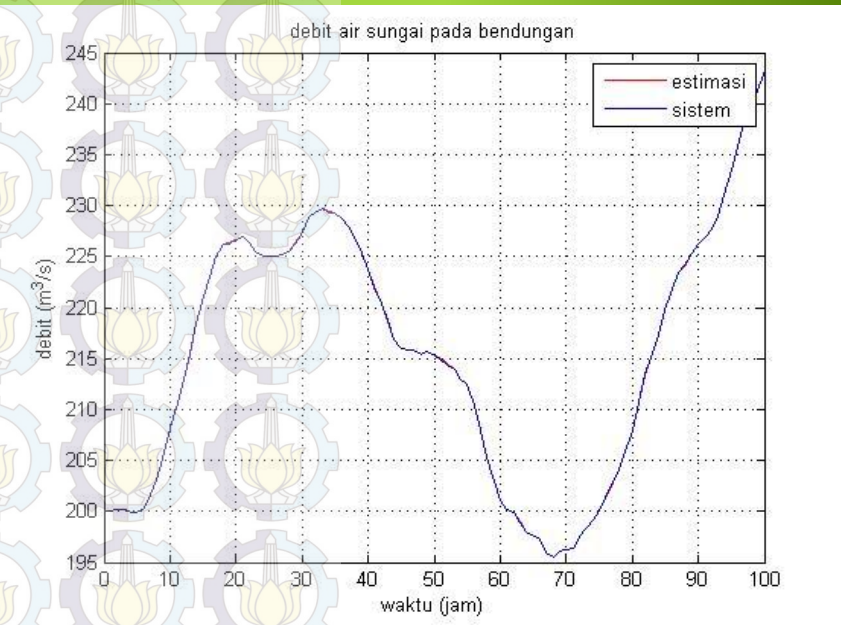
Kesimpulan

Daftar Pustaka

Hasil Simulasi dengan ketinggian awal 16,5 meter dan debit awal 200 m^3/s



Gambar 13. hasil estimasi ketinggian air dengan ketinggian awal 16,5 m



Gambar 14. hasil estimasi debit air dengan debit awal 200 m^3/s

Setelah melakukan simulasi beberapa kali didapatkan RMSE untuk ketinggian air sebesar 0,000974 dan RMSE untuk debit air sebesar 0,1224

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

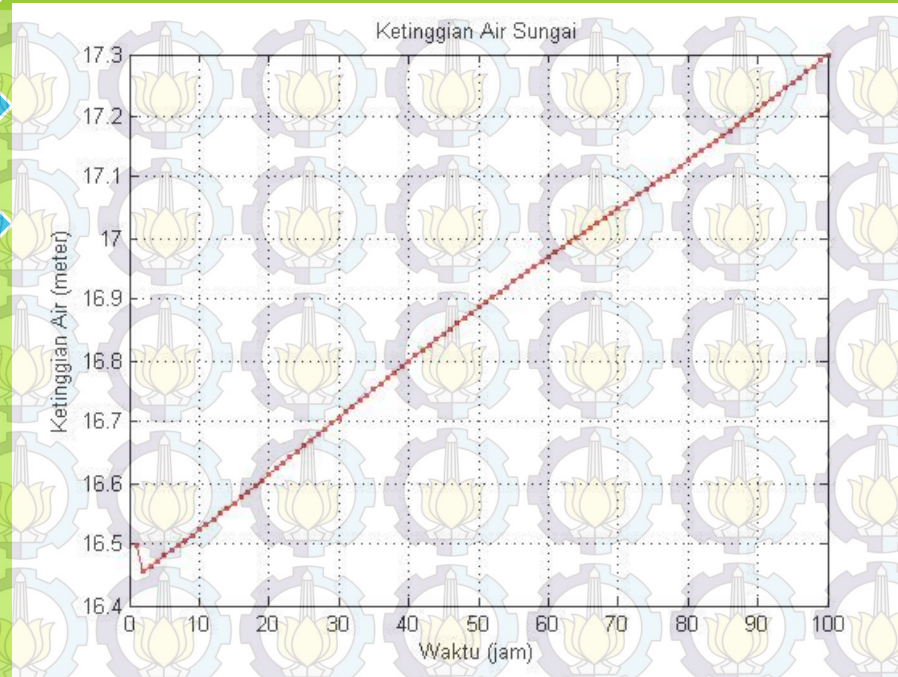
Analisa dan
Pembahasan

1. Diskritisasi Persamaan St. Venant
2. Ensemble Kalman Filter
3. Sliding Mode Control
4. Fuzzy Sliding Mode Control
5. Hasil Simulasi

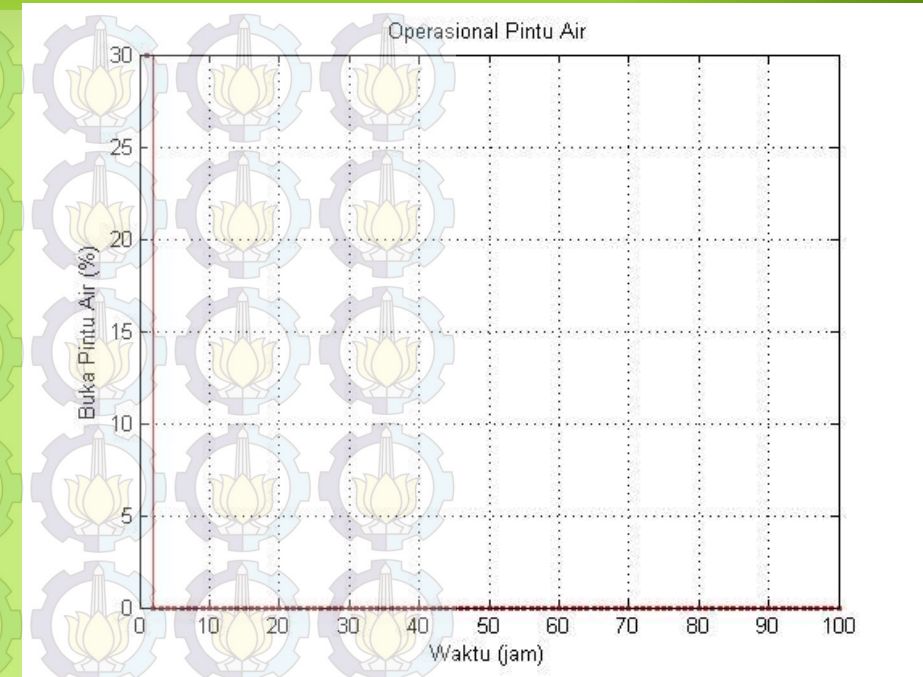
Kesimpulan

Daftar Pustaka

Hasil Simulasi pengendalian pintu air dengan ketinggian awal 16,5 m dan debit awal $200 \text{ m}^3/\text{s}$



Gambar 15. hasil estimasi ketinggian air dengan ketinggian awal 16,5 m



Gambar 16. hasil pengoperasian buka tutup pintu air

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

Kesimpulan

KESIMPULAN

- ▶ Metode *ensemble* Kalman filter memiliki tingkat keakuratan yang sangat baik dalam mengestimasi ketinggian air dan debit air di sungai brantas karena memiliki nilai *root mean square error* (RMSE) yang kecil.
- ▶ Desain pengendalian FSMC merupakan *control input* **OP** yang diperoleh dari hasil fuzzyfikasi dengan masukan S_p dan d yang dapat mengatur besar buka tutup pintu air dengan otomatis.
- ▶ Dari hasil analisa pengendalian pintu air dengan metode FSMC diperoleh bahwa:
 1. Ketika debit air normal, pengendali FSMC bekerja dengan baik dan mampu mengendalikan ketinggian air sesuai dengan ketinggian yang diinginkan. Ketika debit air normal FSMC menghasilkan error sekitar 0,04 meter atau 4 cm.
 2. Ketika debit air tinggi, FSMC juga mampu mengendalikan pintu air sehingga ketinggian turun hingga ketinggian yang diinginkan. Dalam kasus ini error yang dihasilkan sebesar 0,09 meter atau sekitar 9 cm
 3. Ketika debit air rendah dan ketinggian dibawah ketinggian yang diinginkan, FSMC melakukan pengendalian dengan menutup pintu air hingga ketinggian naik sampai mencapai ketinggian yang diinginkan, karena debit yang dimasukkan tergolong rendah, ketinggian air tidak bisa mencapai ketinggian yang diinginkan.

Daftar Pustaka

1. **Kesimpulan**
2. Saran

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

Kesimpulan

SARAN

- ▶ Pada tugas akhir ini, estimasi menggunakan metode EnKf menggunakan matriks identitas pada model pengukuran, pada penelitian selanjutnya bisa digunakan matriks dengan ukuran sesuai titik pengamatan yang diperlukan. Dan bisa dicoba untuk menggunakan metode Kalman filter yang lain seperti *extended* Kalman filter (EKf) ataupun menggunakan metode estimasi yang lainnya.
- ▶ Pada pengendalian menggunakan metode FSMC, ketinggian setelah pintu air diasumsikan konstan. Pada penelitian selanjutnya bisa dilakukan penelitian jika nilai ketinggian setelah pintu air (ZD) tidak konstan. Sehingga ketinggian sebelum pintu air dapat lebih dipengaruhi ketinggian setelah pintu air. Sehingga dapat menyebabkan perubahan ketinggian pada keduanya dapat terjadi lebih fluktuatif. Dan dapat dimodifikasi dalam hal *membership function* sehingga nilai *control input* OP dapat lebih baik sehingga menghasilkan error yang lebih kecil.

1. Kesimpulan
2. **Saran**

Daftar Pustaka

Pendahuluan

Tinjauan Pustaka

Metodologi Penelitian

Analisa dan
Pembahasan

Kesimpulan

Daftar Pustaka

DAFTAR PUSTAKA

- ▶ Herlambang, T. (2010). *Desain Pengendalian Ketinggian Air dan Temperatur Uap pada Sistem Steam Drum Boiler dengan Metode Sliding Mode Control (SMC)*. Surabaya: Jurusan Matematika, FMIPA ITS.
- ▶ Keputusan Menteri Pekerjaan Umum No. 268/KPTS/M/2010 tentang *Pola Pengelolaan Sumber daya Air Wilayah Sungai Brantas*.
- ▶ Palm, R., Driankov, D., dan Hellendoorn, H. 1997. *Model Based Fuzzy Control: Fuzzy Gain Schedulers and Sliding Mode Fuzzy Controllers*. Berlin: Springer-Verlag.
- ▶ Purnaningrum, E. (2014). *Pengendalian Pintu air Bendung Gerak Dengan Metode Ensemble Kalman Filter Berbasis Nonlinear Model Predictive Control (NMPC)*. Surabaya: Jurusan Matematika, FMIPA ITS.
- ▶ Rizan, R. I. (2008). *Analisis dan Perancangan Sistem Pengendali pada Inverted Pendulum Menggunakan Metode Fuzzy Sliding Mode Control*. Surabaya: Jurusan Matematika, FMIPA ITS.
- ▶ Savitri, Y. R., dkk. (2009). *Pengembangan Model Prediksi Operasional Pintu Air Dam Lengkong Menggunakan Neural Network*. Surabaya: Jurusan Teknik Sipil, FTSP ITS.
- ▶ Tomsovic, K. dan Chow, M.Y. 2000. "Control Applications". Tutorial on Fuzzy Logic Applications in Power Systems. Singapore: IEEE-PES
- ▶ Usadha, I.G.N.R. 2002. *Sistem Fuzzy*. Surabaya: Jurusan Matematika ITS
- ▶ Zhou, W., Thoresen, H. M., & Glemmstad, B. (2012). Application of Kalman Filter Based Nonlinear MPC for Flood Gate Control of Hydropower Plant. *Power and Energy Society General Meeting*, Hal. 1-4.